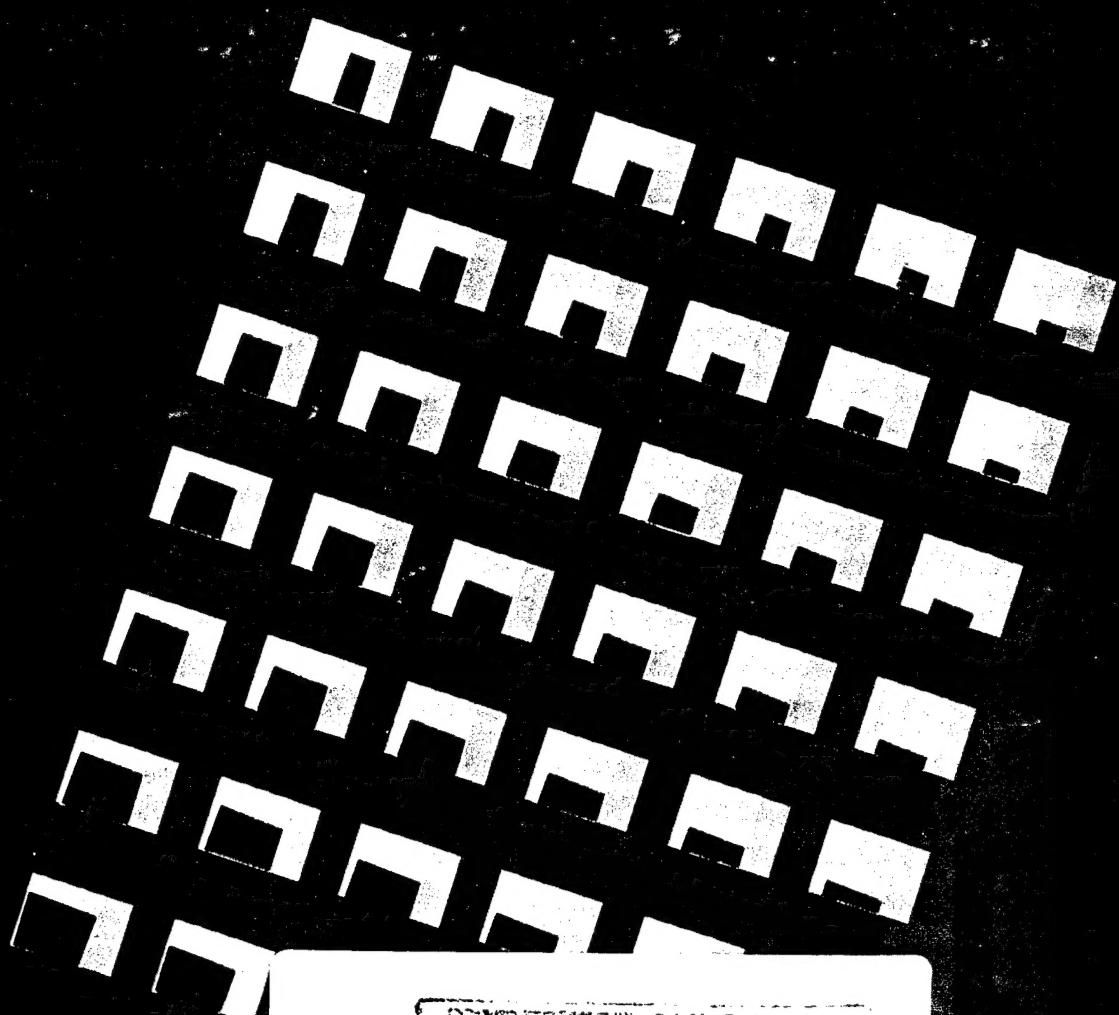


TNO-rapport  
TNO-TM 1995 A-77

titel

## Ontwikkeling van een oordop met actieve geluidreduceertie

TNO Technische Menskunde



DISTRIBUTION STATEMENT  
Approved for public release  
Distribution unlimited

19960417 005

TNO

TNO-rapport  
TNO-TM 1995 A-77

titel  
**Ontwikkeling van een oordop met  
actieve geluidreduceertie**

**TNO Technische Menskunde**

Kampweg 5  
Postbus 23  
3769 ZG Soesterberg  
Telefoon 0346 35 62 11  
Fax 0346 35 39 77

auteurs  
H.J.M. Steeneken  
J.A. Verhave  
S.T. Goverts

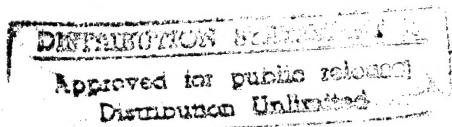
datum  
18 december 1995

Alle rechten voorbehouden.  
Niets uit deze uitgave mag worden  
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt  
door middel van druk, fotokopie, microfilm  
of op welke andere wijze dan ook, zonder  
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd  
uitgebracht, wordt voor de rechten en  
verplichtingen van opdrachtgever en  
opdrachtnemer verwezen naar de  
Algemene Voorwaarden voor onderzoeks-  
opdrachten aan TNO, dan wel de  
betroffende terzake tussen partijen  
gesloten overeenkomst.  
Het ter inzage geven van het TNO-rapport  
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 1995 TNO

aantal pagina's : 28 (incl. bijlagen,  
excl. distributielijst)



DTIC QUALITY INSPECTED 3



**REPORT DOCUMENTATION PAGE**

1. DEFENCE REPORT NUMBER (MOD-NL) TD 95-1497	2. RECIPIENT'S ACCESSION NUMBER	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER TNO-TM 1995 A-77
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO. 786.4	5. CONTRACT NUMBER A94/D/326	6. REPORT DATE 18 December 1995
7. NUMBER OF PAGES 28	8. NUMBER OF REFERENCES 12	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE  Ontwikkeling van een oordop met actieve geluidreductie (Development of an earplug equipped with active noise reduction)		
11. AUTHOR(S) H.J.M. Steeneken, J.A. Verhave and S.T. Goverts		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES)  TNO Human Factors Research Institute Kampweg 5 3769 DE SOESTERBERG		
13. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES)  Director of Defence Research and Development Plein 4 2511 CR DEN HAAG		
14. SUPPLEMENTARY NOTES		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS, 1044 BYTE)  In cooperation with Philips Asset and Groeneveld Elcea an earplug was developed equipped with an active noise reduction system. The goal, to achieve a extra active attenuation of 20 dB, is almost reached. An attenuation of 18 dB was obtained for frequencies below 500 Hz. Reduction of the loop-gain results in an extension of the frequency range with a lower attenuation. The system uses a specific telephone with an improved frequency response with respect to the standard walkman telephones. The costs of both telephone types are equivalent. The special designed telephone, however, has a low impedance which requires a complex adaptation to the electronic control unit. The use of a personal moulded earplug as connection between the ear canal and the electro acoustic part of the system gives some leakage. Application of a standard earplug gives better results and is general applicable, however, the fixation with the ear canal is not as robust as with a personal moulded plug.		
16. DESCRIPTORS		IDENTIFIERS
Active Reduction Hearing Protection Intelligibility Noise Reduction		
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT)	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE)	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT)
18. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT Unlimited availability		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES)

titel : Ontwikkeling van een oordop met actieve geluidreduceertie  
auteurs : Dr.ing. H.J.M. Steeneken, J.A. Verhave en drs. S.T. Goverts  
datum : 18 december 1995  
opdrachtnr. : A94/D/326  
IWP-nr. : 786.4  
rapportnr. : TNO-TM 1995 A-77

In samenwerking met Philips Asset en Groeneveld Elcea is een oordop ontwikkeld die is uitgerust met een actief geluidreduceertiesysteem. Toepassing van actieve geluidreduceertie verhoogt de geluidverzwakking voor lagere frequenties, meestal onder de 1000 Hz. Door in plaats van een oorkap van een oordop gebruik te maken wordt toepassing in combinatie met een helm en gasmasker mogelijk, en wordt ook het comfort verhoogd.

De beoogde geluidverzwakking door het actieve geluidreduceertiesysteem is bijna bereikt (18 i.p.v. 20 dB). Het frequentiebereik is echter beperkt tot 500 Hz; een lager ingestelde actieve verzwakking (regelbaar d.m.v. de lusversterking van het systeem) heeft tot resultaat dat een grotere bandbreedte wordt verkregen.

Het ontwikkelde systeem maakt gebruik van een specifieke telefoon die een betere frequentie-overdracht bezit dan de commercieel verkrijgbare telefoons. De kosten voor beide telefoons zijn gelijk.

Alvorens het eventueel produktierijp maken van het systeem verdient het aanbeveling een aantal beperkingen nader te onderzoeken. Het huidige systeem is, als prototype, toepasbaar voor omgevingslawaainiveaus zoals die optreden in de Leopard of bij een F-16 shelter.

INHOUD	Blz.
SAMENVATTING	5
SUMMARY	6
1 INLEIDING	7
2 ONTWERPCRITERIA	8
2.1 Principe actieve geluidreductie	8
2.2 Transducers	9
2.3 Evaluatiemethoden	10
2.3.1 Criteria	10
2.3.2 Subjectieve bepaling van de geluidverzwakking	10
2.3.3 Objectieve bepaling van de geluidverzwakking	11
3 ONTWIKKELING VAN EEN SPECIFIEKE TELEFOON	12
4 AKOESTISCH ONTWERP	14
5 REGELCIRCUIT	18
6 EVALUATIE	21
7 DISCUSSIE EN CONCLUSIES	24
REFERENTIES	28

Rapport nr.: TNO-TM 1995 A-77

Titel: Ontwikkeling van een oordop met actieve geluidreductie

Auteurs: Dr.ing. H.J.M. Steeneken, J.A. Verhave en  
drs. S.T. Goverts

Instituut: TNO Technische Menskunde  
Afd: Waarneming

Datum: december 1995

DO Opdrachtnummer: A94/D/326

Nummer in MLTP: 786.4

---

#### SAMENVATTING

In samenwerking met Philips Asset en Groeneveld Elcea is een oordop ontwikkeld die is uitgerust met een actief geluidreductiesysteem. De beoogde extra verzwakking door actieve geluidreductie in een oordop is bijna bereikt (18 dB i.p.v. 20 dB). Het frequentiebereik is echter beperkt tot 500 Hz. Een lagere actieve verzwakking levert een breder frequentiebereik.

Het ontwikkelde systeem maakt gebruik van een specifieke telefoon die een betere frequentie-overdracht bezit dan commercieel verkrijgbare telefoons. De kosten zijn voor beide gelijk.

Het toepassen van een otoplastiek als aanpassing aan de gehoorgang levert lek. Het toepassen van een oordop geeft goede resultaten en is tevens niet persoonsgebonden. De fixatie aan de gehoorgang is echter geringer.

**Development of an earplug equipped with active noise reduction**

H.J.M. Steeneken, J.A. Verhave and S.T. Goverts

**SUMMARY**

In cooperation with Philips Asset and Groeneveld Elcea an earplug was developed equipped with an active noise reduction system. The goal, to achieve a extra active attenuation of 20 dB, is almost reached. An attenuation of 18 dB was obtained for frequencies below 500 Hz. Reduction of the loop-gain results in an extension of the frequency range with a lower attenuation.

The system uses a specific telephone with an improved frequency response with respect to the standard walkman telephones. The costs of both telephone types are equivalent. The special designed telephone, however, has a low impedance which requires a complex adaptation to the electronic control unit.

The use of a personal moulded earplug as connection between the ear canal and the electro acoustic part of the system gives some leakage. Application of a standard earplug gives better results and is general applicable, however, the fixation with the ear canal is not as robust as with a personal moulded plug.

## 1 INLEIDING

De klassieke methode voor het beschermen van het gehoororgaan tegen een overdosis lawaai bestaat uit het gebruik van een oorkap of oordopje. Reeds enige jaren wordt bij TNO-TM en elders gewerkt aan een elektro-akoestische toevoeging (Carme, 1987; Olson & May, 1953; Steeneken & Langhout, 1985; Steeneken, 1990; Bronkhorst, 1995) gebaseerd op antigeluid. Deze door Lueg (1936) uitgevonden methode is gebaseerd op het principe aan het oorspronkelijke geluid en identiek geluid toe te voegen maar tegengesteld in polariteit. Het resultaat is een vermindering van de geluiddruk. Deze methode wordt op diverse plaatsen met succes toegepast voor het verbeteren van de geluidverzwakking van oorkappen en in ruimten. TNO-TM heeft een goed werkend systeem ontwikkeld en toegepast bij de tankhelm van de Leopard 2 (Steeneken, Prevo, Agterhuis & Van Blitterswijk, 1992), waarbij een extra geluidverzwakking van ca. 20 dB voor frequenties onder 1000 Hz werd verkregen.

Hetzelfde principe werd toegepast in een oordopje. Hieraan is door TNO-TM en TNO-FEL gewerkt in een kortlopend NTP (A91/K/322). Dit verkennend onderzoek leidde tot een laboratoriummodel waarmee een extra geluidverzwakking van maximaal 15 dB voor de lagere frequenties (< 500 Hz) werd bereikt (Steeneken & Prevo, 1993). Voor een bruikbaar systeem is echter een reproduceerbare actieve geluidverzwakking van ca. 20 dB gewenst. De combinatie van de passieve verzwakking door de oordop en de te verwachten actieve geluidverzwakking zal dan voor de meeste militaire lawaaicondities voldoende bescherming bieden. De resultaten van het genoemde NTP hebben geleid tot een vervolgproject waarvan hier de verkregen resultaten worden gerapporteerd. Op dit moment zijn geen commerciële actieve oordoppen beschikbaar. Wel worden elders experimenten met prototypen uitgevoerd (Herzog & Bruneau, 1993).

Aan dit project werkten drie partners: TNO-TM, Philips Asset en Groeneveld Elcea.

In het verkennend onderzoek was gebleken, dat de commercieel verkrijgbare elektro-akoestische transducers vanwege de ongelijkmatige frequentie-overdracht de beperkende factor zijn. Voor dit project heeft Philips Asset een specifieke transducer ontwikkeld waarbij de beperkingen van de commercieel beschikbare systemen zoveel mogelijk werden opgelost.

Groeneveld Elcea is gespecialiseerd in het maken van otoplastieken (persoonlijk aangemeten oordoppen door middel van een afgietsel van gehoorgang en conga). Hierdoor was het mogelijk tot een systeem te komen dat op robuuste wijze in het oor kan worden aangebracht. Voor de ontwikkeling van een actieve oordop was een kunstoor benodigd waarmee de akoestische metingen kunnen worden uitgevoerd en geen proefpersonen nodig zijn. Daarom is op dezelfde wijze als bij het produceren van een otoplastiek wordt toegepast een model gemaakt aan de hand van een afgietsel van de oorschelp, conga en gehoorgang.

TNO-TM heeft, gebruik makend van de ervaring met de actieve gehoorkap, een akoestisch ontwerp gemaakt waarin de specifiek ontworpen transducer en het otoplastiek tezamen met een miniatuurmicrofoon werden geïntegreerd. Tevens werd het regelcircuit en het bijbehorend versterkersysteem ontworpen. Omdat een ontwerp op basis van een otoplastiek niet universeel toepasbaar is maar beperkt tot de persoon waarvoor het otoplastiek is aangemeten,

werd ook een ontwerp gemaakt waarbij de aanpassing aan de gehoorgang met een standaard oordop werd gerealiseerd.

Het in een actief geluidreductiesysteem toegepaste regelcircuit biedt ook mogelijkheden om externe signalen toe te voegen *zonder* dat deze door het systeem worden onderdrukt. Dit maakt het mogelijk spraak of muzieksignalen via het systeem weer te geven of het systeem te integreren in een intercom of in een ander communicatiesysteem.

Dit rapport doet verslag van de ontwikkeling van de actieve oordop en van de afzonderlijke elementen waaruit het systeem is samengesteld. Tevens worden de prestaties van het systeem aan de hand van een subjectieve en een specifiek ontwikkelde objectieve evaluatiemethode gegeven.

## 2 ONTWERPCRITERIA

### 2.1 Principe actieve geluidreductie

Een actief geluidreductiesysteem is gebaseerd op het toevoegen van een secondair geluid aan het primaire, te onderdrukken, geluid. Als de golfvorm van beide signalen identiek is en qua polariteit tegengesteld, zal de resultante nul zijn. Dit is alleen mogelijk in de theoretische situatie. De praktische realisatie van een dergelijk systeem is gebaseerd op een regelcircuit zoals aangegeven in Fig. 1. Om dit circuit naar behoren te laten functioneren dient aan een aantal criteria te worden voldaan. Dit is uitvoerig beschreven door o.a. Carme (1987), Steeneken e.a. (1985, 1990, 1992a, 1992b), Govers, Verhave en Steeneken (1995) en Gauger (1995).

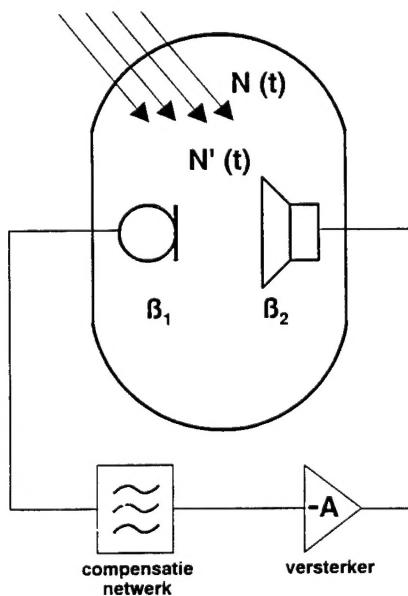


Fig. 1 Principe van een tegengekoppeld circuit zoals toegepast kan worden bij actieve geluidreductie (zie voor de relatie met de vormgeving Fig. 3).

Het regelcircuit bestaat uit twee delen, het elektro-akoestische gedeelte (de oordop met microfoon en telefoon) en de regelversterker. Deze systemen zijn op elkaar afgestemd om een zo hoog mogelijke geluidverzwakking te verkrijgen. In de praktijk wordt echter de stabiliteit van het regelcircuit beperkt door de variabiliteit van de overdracht van telefoon naar de microfoon. Hierbij is de passing van de oordop (een gebruiker-afhankelijke variabele) de belangrijkste factor.

Het in de figuur resulterende ruissignaal  $N'(t)$ , ter plaatse van de microfoon, is de som van het primaire geluid  $N(t)$  dat van buiten de oordop binnendringt en het compenserende signaal dat door de telefoon wordt opgewekt. Dit tweede signaal is oorspronkelijk afkomstig van de microfoon maar is versterkt met een factor gelijk aan de lusversterking en in tegenfase ten opzichte van het microfoonsignaal. Dit resulteert in een geluiddruk volgens:

$$N'(t) = N(t) - N(t)\beta_1\beta_2 \cdot A \quad (1)$$

$$N'(t) = \frac{N(t)}{1 + \beta_1\beta_2 \cdot A} \quad (2)$$

Hierbij vertegenwoordigt  $\beta$  de frequentie-overdracht van de elektro-akoestische transducers (microfoon  $\beta_1$  en luidspreker  $\beta_2$ ) en  $A$  de frequentie-overdracht van de versterker en het compensatiennetwerk. De mate van onderdrukking wordt gegeven door de noemer in vergelijking (2). Toename van de lusversterking ( $\beta_1\beta_2 \cdot A$ ) resulteert in een grotere onderdrukking van het primaire geluid. Helaas is de lusversterking niet onbeperkt op te voeren. Daar  $\beta$  en  $A$  frequentie-afhankelijk zijn is ook de rondgaande fasedraaiing frequentie-afhankelijk en kan de situatie ontstaan dat bij een bepaalde frequentie de secundaire geluidsgolf niet meer in tegenfase is. Bij een lusversterking groter of gelijk aan "1" ontstaat dan een instabiel (oscillerend) systeem. Om dit circuit naar behoren te laten functioneren dient aan een aantal criteria te worden voldaan die betrekking hebben op de grootte en de fasedraaiing van de lusversterking.

## 2.2 Transducers

De keuze van de telefoon en het plaatsen hiervan in een optimale akoestische omgeving leveren beperkingen op ten aanzien van zowel de amplitude-overdracht als de fase-overdracht. Deze twee variabelen zijn afhankelijk en niet willekeurig te optimaliseren. Er is een inventarisatie uitgevoerd naar telefoontypen die qua frequentiebereik, grootte en maximale geluiddruk toepasbaar zijn. Ten aanzien van de frequentie-overdracht is gestreefd naar een constante amplitude-overdracht in het bereik van ca. 20 Hz tot ca. 5 kHz. De fase-overdracht dient in het bereik van 50 Hz tot ca. 1 kHz minder dan 60° van het gemiddelde af te wijken in verband met de stabiliteit. De maximale geluiddruk die de telefoon (in een beperkt volume) kan leveren bepaalt het maximale te onderdrukken niveau en dient daarom ten minste 120 dB re 20  $\mu$ Pa te bedragen.

Ten aanzien van de microfoon is de keuze eenvoudiger. Moderne miniatuur electret-microfoons omvatten een frequentiebereik dat groter is dan voor het actieve geluidreductie-

systeem nodig is. Minstens twee microfoons komen in aanmerking (Sennheiser type KE 4-211-2 en Microtel type M34).

Behalve optimalisatie door de componentkeuze is een aantal akoestische parameters onderzocht en geoptimaliseerd. Deze parameters zijn het volume voor en achter de telefoon, de plaatsing van de microfoon ten opzichte van de telefoon en het aanbrengen van geluidabsorptiemateriaal.

## 2.3 Evaluatiemethoden

### 2.3.1 Criteria

Aan een gehoorbeschermer, in dit geval een actieve oordop, dienen een aantal eisen te worden gesteld die een veilige bescherming bij toepassing in hoge lawaainiveaus garanderen. De totale geluidverzwakking (passief en actief als functie van de frequentie) is van belang om het maximaal toelaatbare geluidniveau waarin het systeem kan worden toegepast te bepalen. Voor een goed systeem geldt dat tenminste een totale verzwakking (ook voor de lage frequenties) van 30 dB wordt verkregen. De geluidverzwakking kan subjectief met proefpersonen of objectief met een meetapparaat worden bepaald.

Tevens is van belang of het actieve systeem bij toepassing door verschillende gebruikers stabiel blijft en niet oscilleert. Hierbij speelt de toegepaste veiligheidsmarge in het afregelen van de lusversterking van het regelsysteem een belangrijke rol. Over het algemeen wordt een marge van 6 dB onder het punt van instabiliteit gehanteerd (zie § 2.1).

De dynamiek van een actief geluidreductiesysteem is over het algemeen beperkt. Bij te hoge niveaus kan het systeem oversturen en signalen opwekken die een niveau hebben boven het maximale niveau dat voor gehoorbeschadiging wordt gehanteerd. Bij lage niveaus is meestal een zachte systeemruis hoorbaar maar dat heeft verder geen invloed op de goede werking. Tenslotte kunnen nevengeluiden optreden door microfonie of variaties in het luchtvolume tussen trommelvlies en telefoon zoals bij het bewegen kan optreden. Te grote variaties leiden tot aanzienlijke drukverschillen die het microfooncircuit kunnen oversturen. Een gecontroleerde ventilatie kan dit bezwaar opheffen maar heeft tevens tot gevolg dat de respons voor lage frequenties sterk afneemt.

### 2.3.2 Subjectieve bepaling van de geluidverzwakking

Het subjectief bepalen van de geluidverzwakking kan slechts gescheiden worden uitgevoerd, namelijk voor de passieve verzwakking en voor de bijdrage van het actieve systeem. De passieve verzwakking wordt bepaald door de gehoordrempel te meten met en zonder de oordop (met uitgeschakeld actief systeem) bij het oor van de proefpersoon. Het verschil tussen beide drempels per frequentieband (bijvoorbeeld per 1/3 octaafband) levert de passieve verzwakking. Dit is een door ISO gestandaardiseerde methode. Het toepassen van deze methode voor de evaluatie van de extra bijdrage aan de verzwakking van het actieve systeem is niet mogelijk omdat de gehoordrempel door de ruis van het systeem niet nauwkeurig kan worden gemeten. Daarom is een andere methode ontwikkeld die slechts de bijdrage van het actieve gedeelte bepaalt.

Dit geschieft door een proefpersoon van twee afwisselende signalen gelijke luidheid te laten instellen. In één der condities wordt het signaal aangeboden zonder dat het actieve geluidreductiesysteem is ingeschakeld en in de andere conditie met het systeem ingeschakeld. Door nu de proefpersoon een der niveaus zo te laten instellen dat hij een stationair, niet fluctuerend, signaal hoort zal het fysisch aanwezige niveauverschil buiten het systeem overeenkomen met de *subjectieve* geluidverzwakking door het actieve geluidreductiesysteem geïntroduceerd. De methode wordt uitgevoerd voor smalbandige ruissignalen (1/3 octaaf). Op deze wijze wordt de verzwakking als functie van de frequentie verkregen. De methode correleert goed met objectieve metingen die zijn uitgevoerd in een eerder onderzoek naar de evaluatie van oorkappen (Steeneken & Langhout, 1985).

### 2.3.3 Objectieve bepaling van de geluidverzwakking

De objectieve geluidverzwakking van een oorkap kan worden bepaald door het geluidniveau binnen en buiten de kap te vergelijken. Onder de oorkap kan de meetmicrofoon afzonderlijk worden aangebracht nabij de ingang van de gehoorgang of er kan gebruik worden gemaakt van de lusmicrofoon die reeds in het actieve geluidreductiesysteem aanwezig is (zie Fig. 1). De laatste methode is ook toepasbaar bij oordoppen. Bij gebruikmaking van een oordop kan echter geen extra microfoon worden aangebracht achter de dop. Daarom is een kunstoor ontwikkeld waar ter plaatse van het trommelvlies een extra meetmicrofoon aanwezig is. In Fig. 2 is een afbeelding van dit kunstoor gegeven.

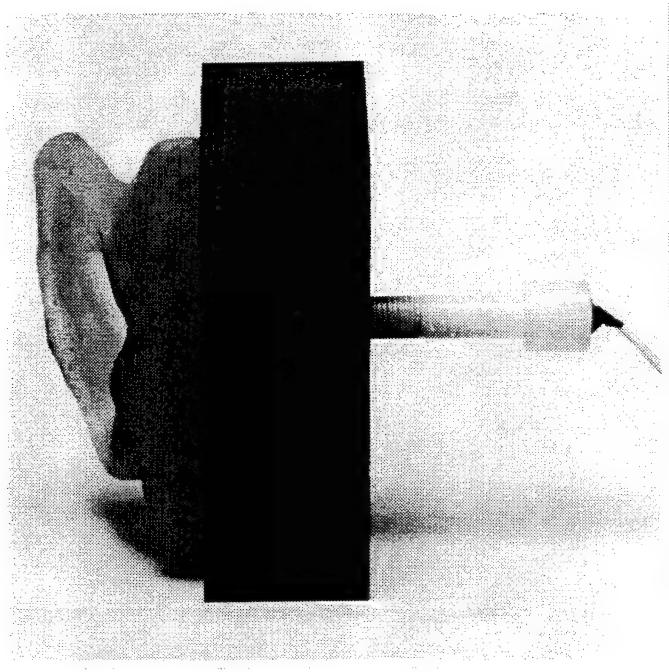


Fig. 2 Kunstoor waarin aan de achterzijde een sonde zichtbaar is waarvan de tip voorzien is van een meetmicrofoon die ter plaatse van het denkbeeldige trommelvlies is gepositioneerd.

De meetmicrofoon wordt aan de achterzijde naar de plaats van het trommelvlies geleid. Ter controle van de goede afdichting wordt het kunstoor afgesloten met een plastisch materiaal en vervolgens de maximale demping bepaald. Deze blijkt meer dan 45 dB te bedragen over een frequentiebereik van 63 Hz tot 10 kHz, zodat de lagere geluidverzwakking van het actieve geluidreductiesysteem hiermede bepaald kan worden. Omdat niet de juiste akoestische impedantie van het trommelvlies wordt nagebootst is de methode slechts een eerste orde benadering.

### 3 ONTWIKKELING VAN EEN SPECIFIEKE TELEFOON

Commercieel beschikbare telefoons die qua frequentie-overdracht voldoen aan de criteria die worden gesteld voor het maken van een stabiele regellus blijken niet vorhanden. Ofschoon de telefoons die worden toegepast bij draagbare audio-apparatuur (Walkman) een breed frequentiegebied bestrijken is de overdracht door specifieke resonanties niet optimaal voor actieve geluidreductie. Dit werd reeds vastgesteld bij het pilot-onderzoek (Steeneken e.a., 1992b) maar is ook in dit project systematisch door Philips onderzocht. Ook het modificeren van commercieel beschikbare telefoons leverde slechts een geringe verbetering in de frequentie-overdracht. Om deze reden is in dit project een aparte ontwikkeling van een speciale telefoon opgenomen. De te ontwerpen telefoon dient een vlakke frequentie-overdracht te bezitten voor frequenties tussen 10 Hz en 2000 Hz en zo mogelijk een fase-overdracht die in dit frequentiegebied binnen 60° om de nominale waarde blijft. De technologie berust op toepassen van een folie als membraan van de telefoon. Op de folie is de vlakke spreekspoel aangebracht die in een zo homogeen mogelijk magnetisch veld is geplaatst. De spreekspoelimpedantie is vanwege mechanische beperkingen en de toe te passen belastbaarheid zeer laag ( $4,7 \Omega$ ). Dit heeft consequenties voor de te ontwerpen versterker.

De akoestische uitgang heeft de vorm van een buisje dat gemakkelijk aansluit op het otoplastiek of op een normale oordop. De telefoon, gekoppeld aan een otoplastiek, is weergegeven in Fig. 3. Dwars op de akoestische uitgang, zo dicht mogelijk bij het membraan, is de lusmicrofoon geplaatst (herkenbaar aan de drie aansluitdraden).

In dit telefoonontwerp is de verhouding van de volumina voor en achter het membraan geoptimaliseerd alsmede de vorm en flux van de magneet en de positie en vorm van het membraan. Tenslotte is een aanzienlijke luchtdemping om het membraan ingebouwd om de invloed van resonanties te beperken. De frequentie-overdracht (amplitude en fase) is gegeven in Fig. 4 en toont een vlakke gelijkmataige amplitude overdracht en een faseoverdracht (Fig. 5) die tot ca. 2000 Hz minder dan 60° varieert. Op basis van deze telefoon is het akoestisch ontwerp verder uitgewerkt.

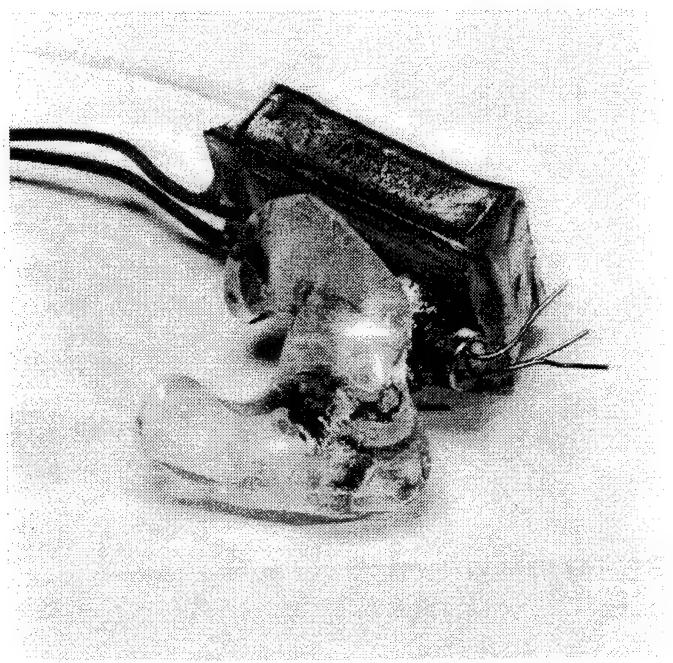


Fig. 3 De speciaal ontworpen telefoon gekoppeld aan een otoplastiek. De microfoon (rechts onder) is juist zichtbaar aan de zijkant van de akoestische uitgang (pijpje dwars op telefoon).

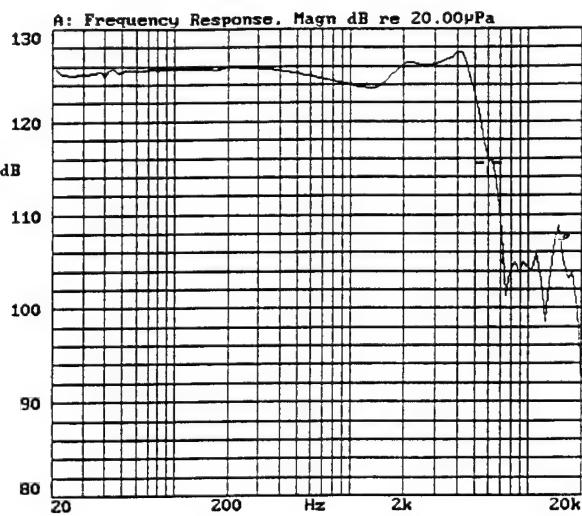


Fig. 4 Amplitude-frequentie-overdracht van de door Philips Asset ontworpen telefoon.

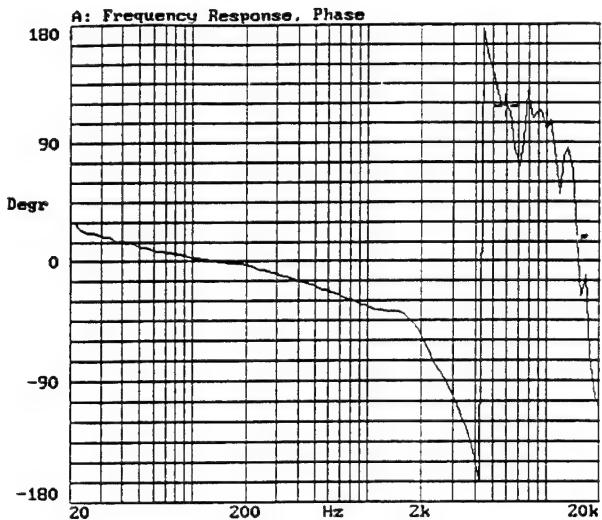


Fig. 5 Fase-overdracht van de door Philips Asset ontworpen telefoon.

#### 4 AKOESTISCH ONTWERP

Voor het complete akoestische systeem worden telefoon, microfoon en oordop samengebouwd. Hierbij zijn de volgende factoren van belang:

- de positie van de microfoon t.o.v. de telefoon op de overdracht tussen beide transducers,
- het toegevoegde luchtvolume door het otoplastiek en het resterende gedeelte in de gehoorgang,
- de eventuele lekkage langs het otoplastiek hetgeen resulteert in een (akoestisch) groter volume voor de telefoon en een afname van de gevoeligheid voor lage frequenties,
- luchtdrukveranderingen geïntroduceerd door volume veranderingen bij het bewegen van het systeem in de gehoorgang. Dit kan resulteren in oversturing van de microfoon of de versterkers in het regelcircuit.

In Fig. 6 wordt een beeld gegeven een systeem dat is samengesteld uit telefoon, microfoon en otoplastiek. De koppeling tussen otoplastiek en telefoon is zodanig uitgevoerd dat de telefoon vrij van de oorschelp blijft. Bij een eventuele definitieve uitvoering dient het geheel in een kunststof behuizing te worden opgenomen om een gebruikersvriendelijke vorm te krijgen.

De amplitude-frequentie-overdracht tussen telefoon en microfoon werd geoptimaliseerd door het aanpassen van een aantal ontwerp vrijheden zoals: volume voor de telefoon, absorptie in de aanpassingsbuis en de positie en type van de microfoon. De resulterende amplitude-overdracht is gegeven in Fig. 7 en de bijbehorende fase-overdracht is gegeven in Fig. 8.

Hierbij was het systeem in het oor van een proefpersoon geplaatst zodat het otoplastiek met een representatief volume was afgesloten. Het blijkt dat de amplitude-overdracht naar de lagere frequenties sterk afneemt. Dit duidt op lekkage. Daarom is in dezelfde figuur de amplitude-overdracht gegeven voor de situatie dat het otoplastiek werd aangeduwd, hetgeen een veel vlakkere overdracht oplevert.

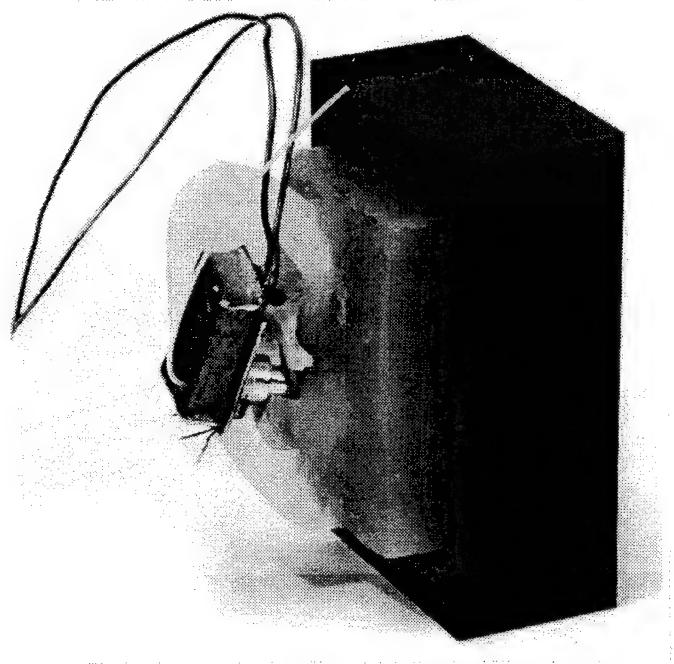


Fig. 6 Actieve oordop op basis van het otoplastiek geplaatst in een kunstoer.

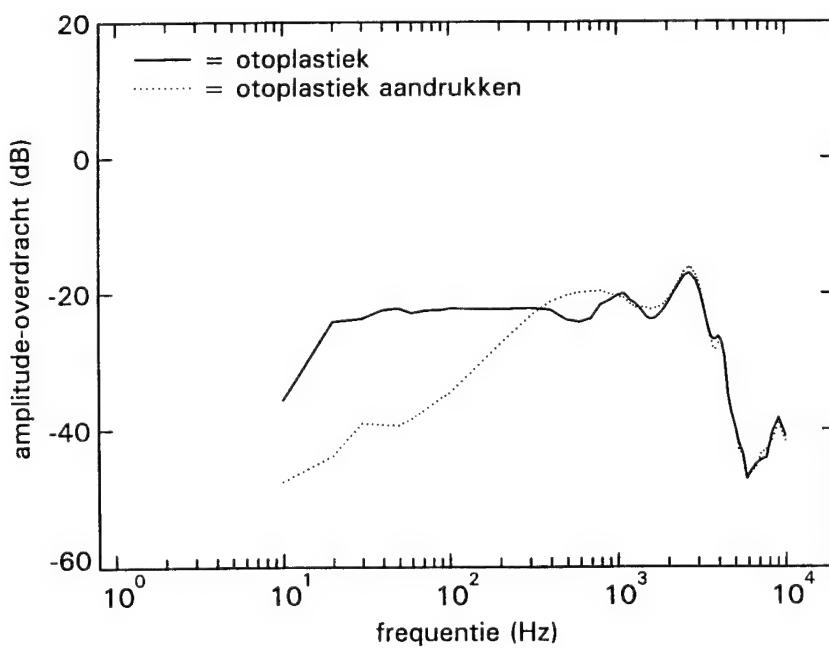


Fig. 7 Amplitude-overdracht voor het systeem volgens Fig. 6. De getrokken lijn duidt op de situatie waarbij het otoplastiek werd aangeduwd om daarmee de lekkage langs het otoplastiek te verminderen.

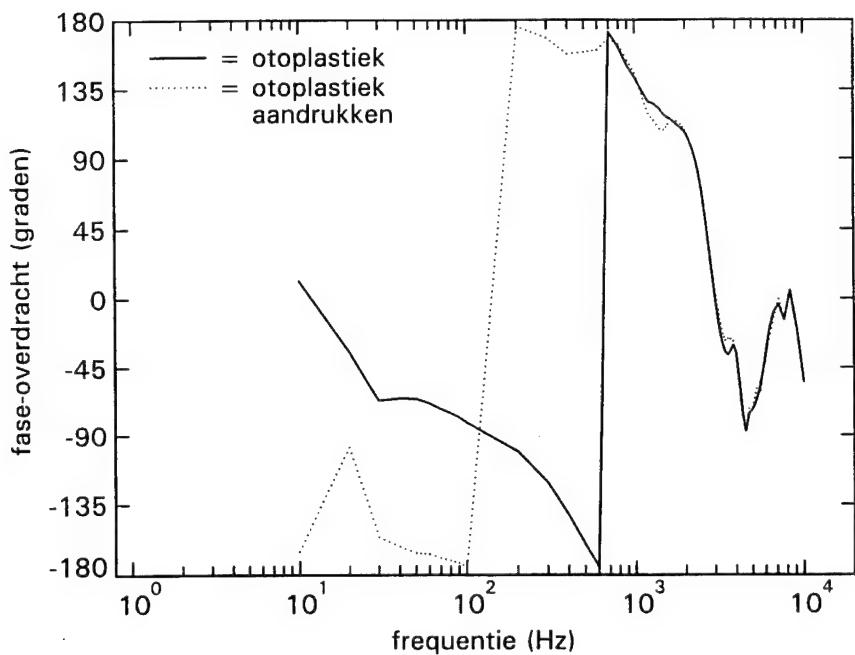


Fig. 8 Fase-frequentie-overdracht voor het systeem volgens Fig. 6. De getrokken lijn duidt op de situatie waarbij het otoplastiek werd aangeduwd en daarmee de lekkage langs het otoplastiek te verminderen.

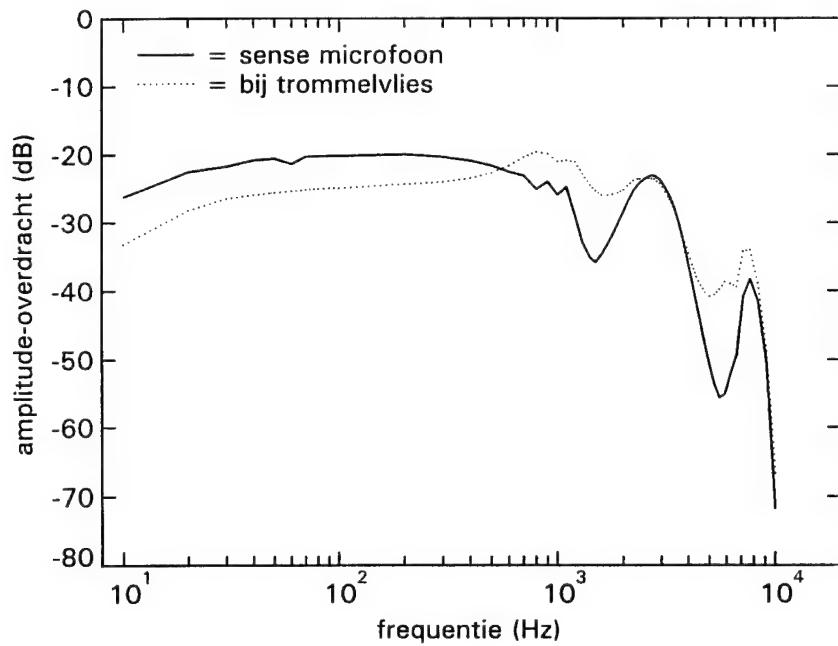


Fig. 9 Vergelijking van de amplitude-frequentie-overdracht voor de lusmicrofoon en voor de positie bij het trommelflies.

Van belang is of de geluiddruk die optreedt bij de microfoon overeenkomt met de geluiddruk nabij het trommelflies. Daarom werd de overdracht van het systeem in het kunstoor bepaald

voor de microfoon die ter plaatse van het trommelsel was opgenomen. De vergelijking tussen de overdracht voor de lusmicrofoon en de microfoon ter plaatse van het trommelsel is gegeven in Fig. 9. De figuur toont aan dat slechts een gering verlies bij de lagere frequenties optreedt zodat de positie van de lusmicrofoon (zo dicht mogelijk bij de telefoon) kan worden gehandhaafd.

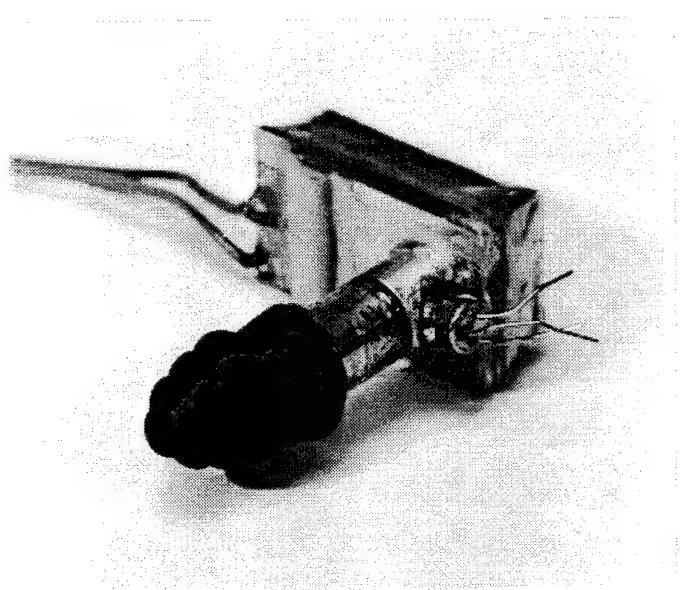


Fig. 10 Telefoon en microfoon samengebouwd met een Racal oordop.

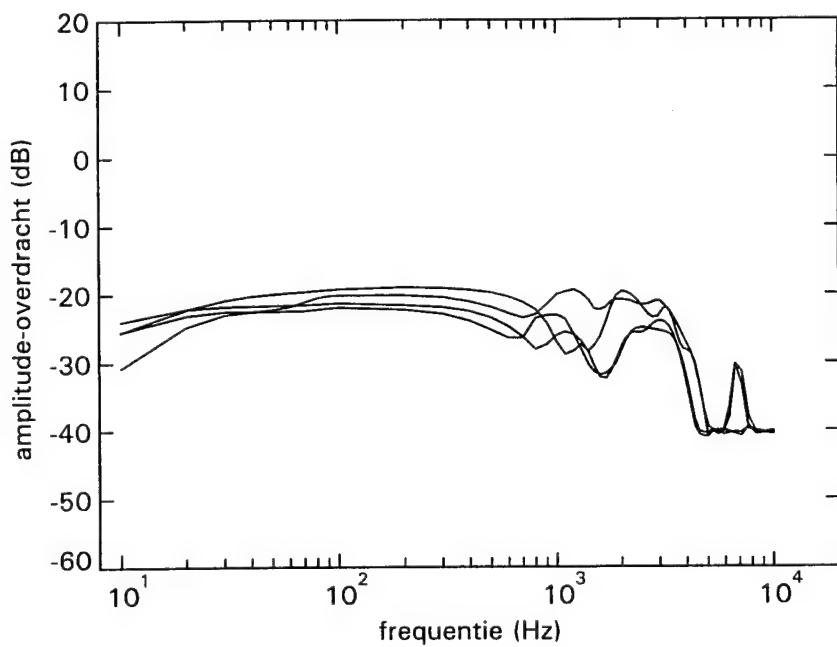


Fig. 11 Amplitude-frequentie-overdracht van het systeem gegeven in Fig. 10 geplaatst in vier verschillende oren.

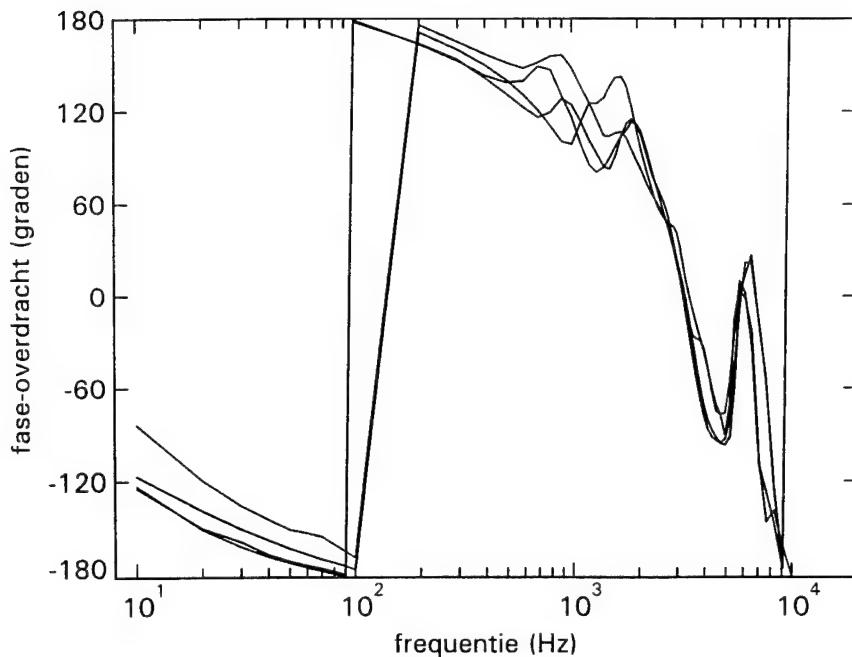


Fig. 12 Fase-frequentie-overdracht van het systeem gegeven in Fig. 10 geplaatst in vier verschillende oren.

De invloed van de lekkage die het otoplastiek geeft (vastgesteld bij meerdere proefpersonen) heeft een nadelige invloed op de te behalen actieve geluidverzwakking. Daarom is nagegaan of een betere afdichting kan worden verkregen zonder dat het extra aandrukken van het systeem nodig is. Hiertoe is in plaats van het otoplastiek een flexibele oordop toegepast (van het type Willson EP100 of Racal). In Fig. 10 is een overzicht gegeven van het systeem uitgerust met een Racal oordop. De amplitude- en fase-overdracht, bepaalt voor vier proefpersonen, is gegeven in Fig. 11 en 12.

## 5 REGELCIRCUIT

De gebruikelijke opbouw van de lusversterker en het compenserende netwerk is gegeven in Fig. 13. Als eerste module is een microfoonversterker nodig die het zwakke microfoon-signalen aanpast aan de nominale circuitniveaus. De dynamiek van deze versterker is van belang omdat zowel de zeer hoge niveaus van bijvoorbeeld schietlawaai als signalen met lage niveaus moeten worden verwerkt.

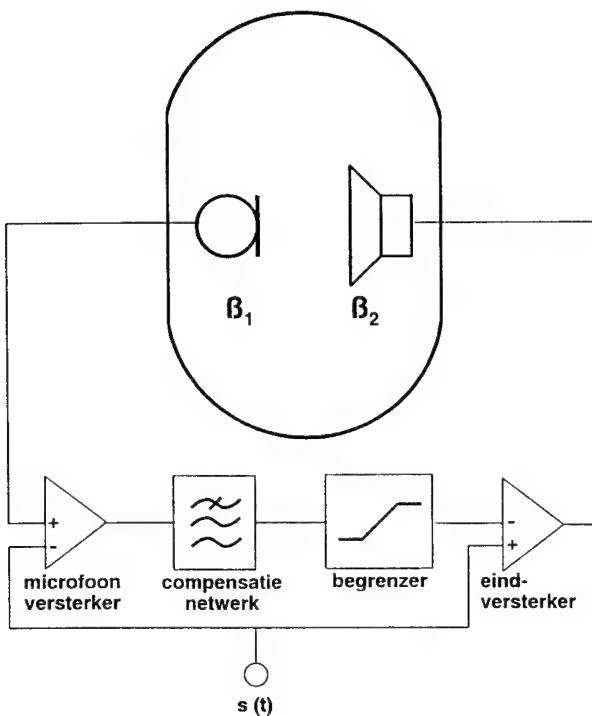


Fig. 13 Blokschematische opbouw van het regelcircuit. Tevens is aangegeven waar het spraaksignaal  $s(t)$  wordt aangesloten.

Vervolgens is een tweetraps compensatieversterker nodig om de gehele keten aan de stabiliteitscriteria aan te passen bij een zo groot mogelijke lusversterking. Dit resulteert meestal in een laagdoorlaatfilter bij een afsnijfrequentie tussen 1000 en 2000 Hz om de lusversterking in het frequentiegebied boven ca. 1500 Hz te verlagen omdat anders, in combinatie met de hier optredende phasedraaiing, niet meer aan de stabiliteitscriteria wordt voldaan. De compensatiemodule wordt gevolgd door een signaalbegrenzer en een eindtrap.

Om spraakcommunicatie via het regelcircuit mogelijk te maken is een spraakingang aangebracht waarbij ervoor gezorgd is dat het spraaksignaal niet wordt onderdrukt.

Voor de optimalisatie van de frequentie-overdracht van de gehele keten is gebruik gemaakt van een speciaal ontwerppakket (MATLAB) waarmee voornamelijk de compensatiemodule is aangepast.

In Fig. 14 en 15 wordt respectievelijk de amplitude-overdracht en de fase-overdracht gegeven voor het totale systeem. Met dit ontwerp op basis van de oordop is de evaluatie voor het bepalen van de geluidverzwakking uitgevoerd.

In Fig. 16 is op basis van de overdrachtfuncties, zoals gegeven in Fig. 14 en 15, het Nyquist-diagram gegeven. Het Nyquist-diagram geeft de vectoriële weergave van amplitude- en fase-overdracht voor de lusversterking. Instabiliteit wordt verkregen als de curve het met een stip (•) aangegeven punt omvat. Bij dit punt is de rondgaande versterking "1" (0 dB) en de phasedraaiing "0" (zie § 2.1). Het is van belang dat de rondgaande versterking minstens -6 dB is in dit punt om een goede stabiliteit te waarborgen. Een veilig criterium is tevens dat in het gebied waarin de fase varieert tussen  $60^\circ$  en  $-60^\circ$ , de lusversterking niet boven 0 dB komt. In het hier gegeven ontwerp wordt daar net niet aan voldaan.

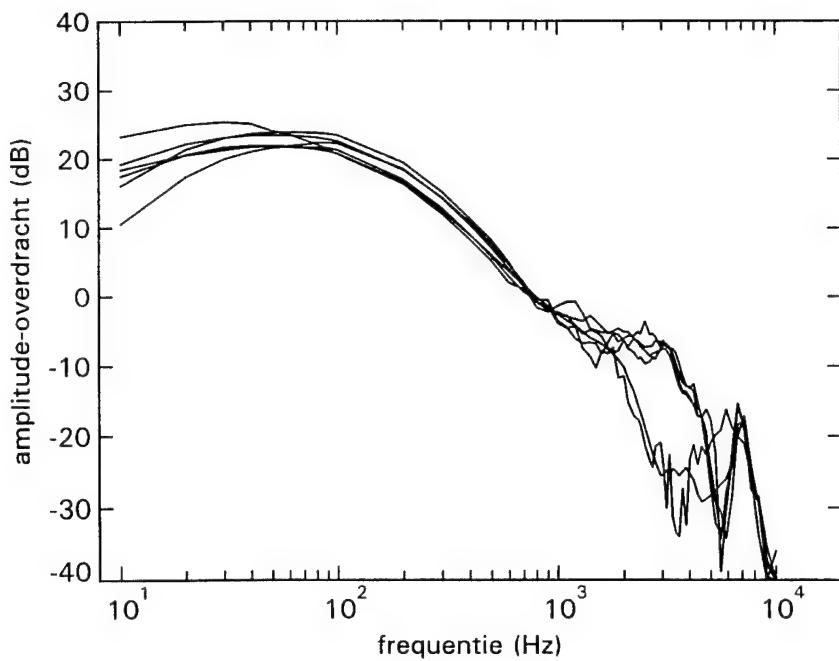


Fig. 14 Amplitude-overdracht van de totale keten (compensatieversterker en elektro-akoestische koppeling).

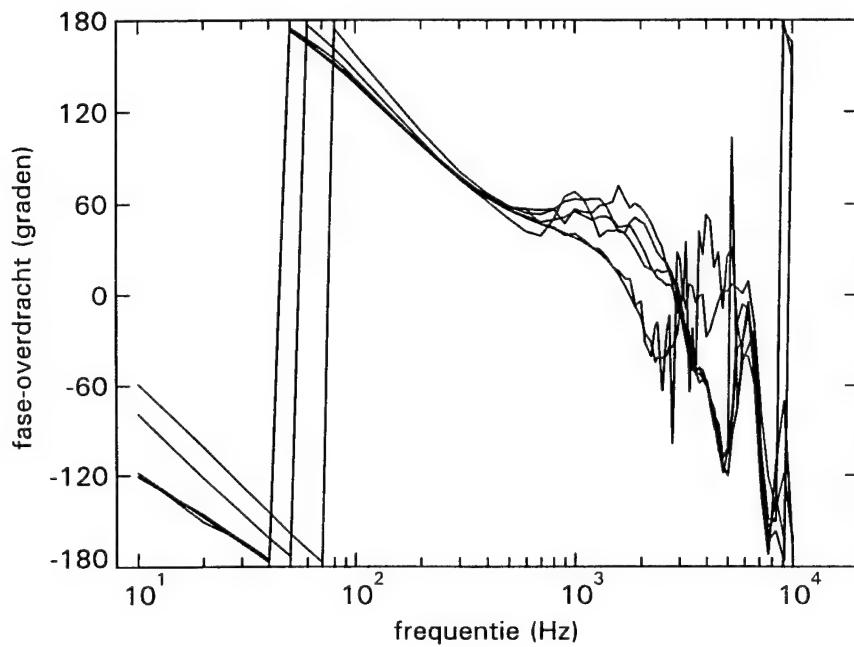


Fig. 15 Fase-overdracht van de totale keten (compensatieversterker en elektro-akoestische koppeling).

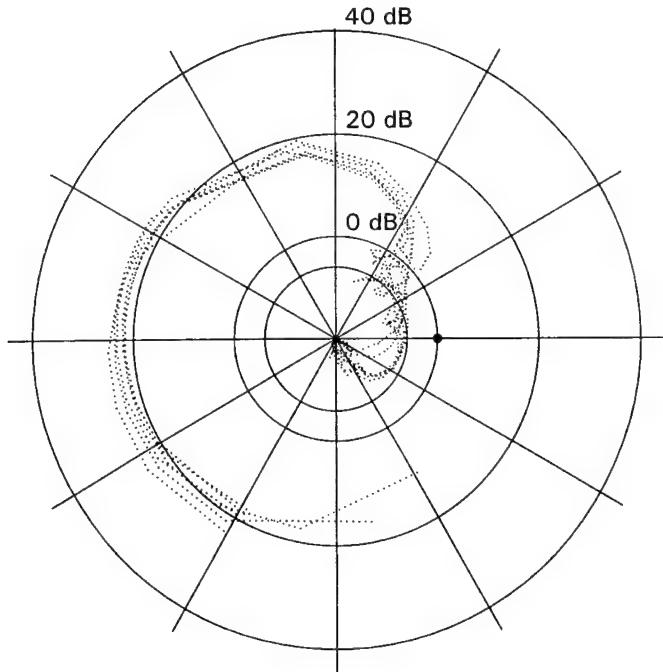


Fig. 16 Nyquist-diagram van de totale keten gebaseerd op de amplitude- en fase-overdracht volgens Fig. 14 en 15.

## 6 EVALUATIE

De prestatie van de actieve oordop werd vastgelegd door zowel objectief als subjectief de geluidverzwakking als functie van de frequentie te bepalen. De objectieve metingen werden uitgevoerd door de oordop in het kunstoor te plaatsen (zie § 2.3.3 en Fig. 6). Kunstoor en oordop werden opgesteld in een ruimte met een diffuus geluidveld. Het ruisniveau bedroeg ca. 100 dBA, het geluidsspectrum was vlak voor octaafbanden (roze ruis). Met de microfoon die ter plaatse van het trommelvlies was aangebracht werd het geluidsspectrum bepaald voor drie condities: open oor, met oordop maar uitgeschakeld actief systeem (passieve oordop), met aangeschakeld actief systeem (passief en actief). Er werden metingen uitgevoerd voor twee condities van de regelversterker met een lusversterking van  $-6\text{ dB}$  en  $-12\text{ dB}$  ten opzichte van het punt van instabiliteit. In Fig. 17 zijn voor beide situaties de gevonden geluidsspectra voor de drie condities gegeven. De opslingeringsfactor voor de conditie open oor wordt veroorzaakt door resonantie die wordt bepaald door de lengte van de gehoorgang. Om een indruk te krijgen van de bijdrage van het actieve systeem zijn de spectra voor de condities met en zonder actief systeem vergeleken.

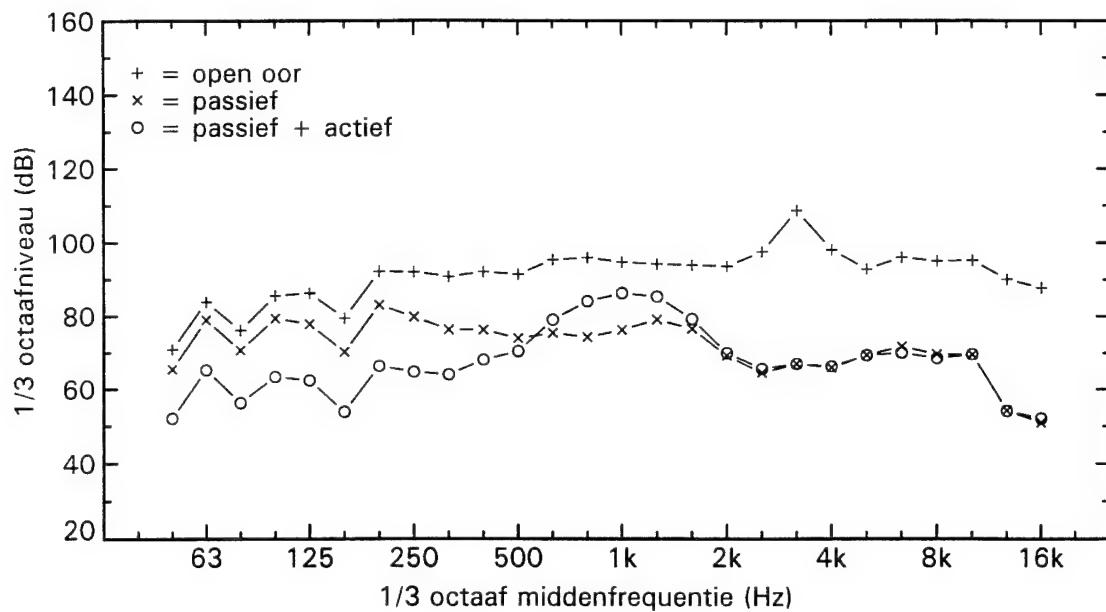


Fig. 17 Geluiddrukniveaus gemeten met het kunstoor ter plaatse van het trommelselvlie voor de condities: open oor, oordop no. 1 passief, oordop no. 1 passief en actief. De lusversterking was ingesteld op ca. 6 dB onder het instabiliteitspunt. Het niveau van het omgevingslawaai (roze ruis) bedroeg ca. 100 dBA.

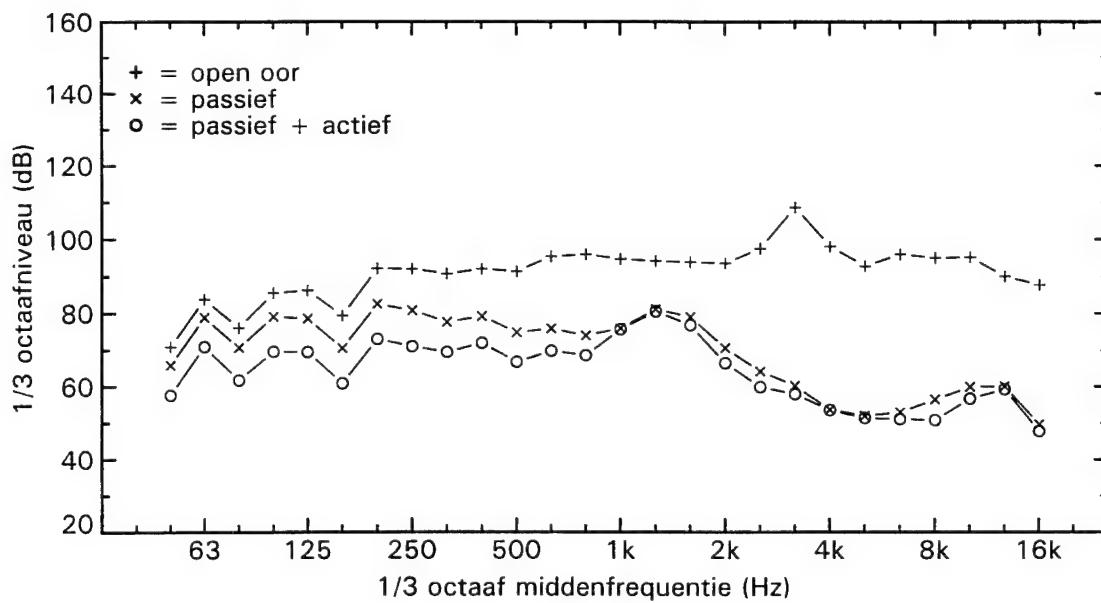


Fig. 18 Geluiddrukniveaus gemeten met het kunstoor ter plaatse van het trommelselvlie voor de condities: open oor, passief, passief en actief. De lusversterking was ingesteld op ca. 12 dB onder het instabiliteitspunt. Het niveau van het omgevingslawaai (roze ruis) bedroeg ca. 100 dBA.

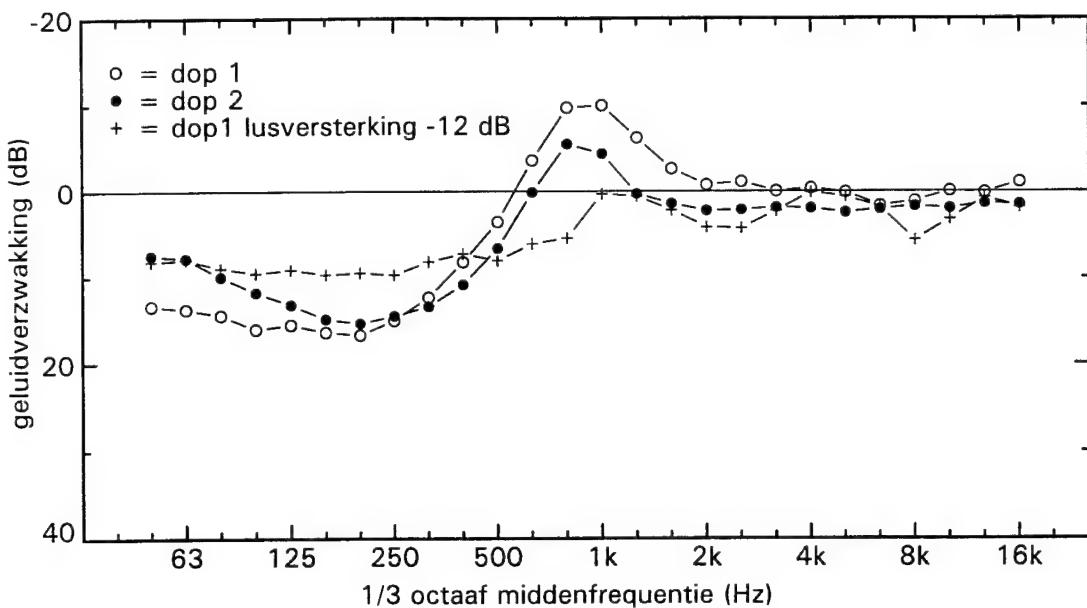


Fig. 19 Actieve geluidverzwakking voor twee oordoppen gemeten met de objectieve methode. Tevens is de actieve geluidverzwakking voor oordop 1 gegeven in de situatie dat de lusversterking was ingesteld 12 dB onder het stabiliteitscriterium.

Het verschil tussen beide spectra is gegeven in Fig. 19 voor twee oordoppen. Tevens is voor één oordop de lusversterking verlaagd tot een niveau van  $-12$  dB onder het stabiliteitscriterium. Voor deze conditie zijn de resultaten gegeven in Fig. 18. Afhankelijk van de ingestelde lusversterking varieert de actieve onderdrukking tussen  $18$  en  $10$  dB. Een geringere lusversterking heeft een positief effect op het frequentiebereik van het systeem.

Tevens is de actieve onderdrukking subjectief bepaald met de methode beschreven in § 2.3.2. De resultaten zijn gegeven in Fig. 20 voor drie proefpersonen. De subjectieve metingen vinden plaats voor beide oren tegelijk zodat de weergegeven verzwakking de minimale waarde voor beide oren vertegenwoordigt. Bij lage frequenties is het moeilijk om de subjectieve meting uit te voeren. De proefpersonen hebben moeite om het niveau voor de beide aanbiedingscondities te vergelijken. De resultaten van de subjectieve metingen stemmen redelijk overeen met de objectieve.

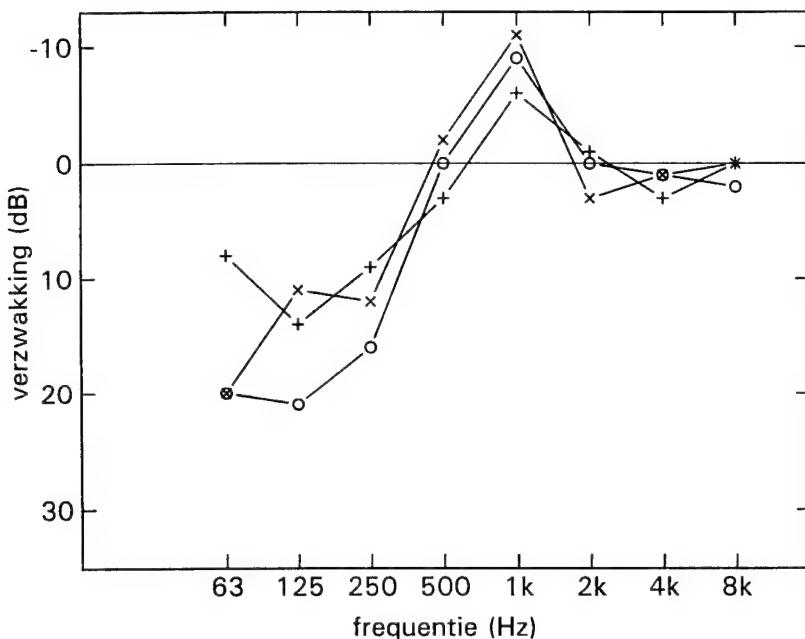


Fig. 20 Actieve geluidverzwakking voor drie proefpersonen gemeten met de subjectieve methode.

Uit de meetresultaten blijkt dat bij de optimaal ingestelde lusversterking (6 dB onder het instabiliteit criterium) actieve onderdrukking optreedt tot ca. 500 Hz en dat een aanzienlijke opslingeringsing bij ca. 1000 Hz plaats vindt. Bij een afname van de lusversterking treedt dit effect niet op en wordt het frequentiebereik waarin onderdrukking optreedt groter. De maximale onderdrukking wordt dan echter beperkt tot ca. 10 dB. Voor optimale toepassing in relatie tot een bepaald type te onderdrukken geluid dient dus de lusversterking te worden aangepast.

## 7 DISCUSSIE EN CONCLUSIES

### *Algemeen*

Het beoogde doel van dit project, het ontwikkelen van een oordop met actieve geluidreductie waarmee een extra geluidverzwakking van 20 dB kan worden bereikt, is bijna bereikt. De maximaal verkregen actieve verzwakking bedraagt 18 dB. Deze verzwakking treedt op bij het trommelvlies. Voor het regelcircuit is echter bepalend de onderdrukking ter plaatse van de lusmicrofoon. Deze hier optredende verzwakking is groter dan 20 dB. De verzwakking tussen de positie bij de lusmicrofoon en het trommelvlies dient dus laag te zijn.

Het bleek dat het toepassen van een otoplastiek (harde uitvoering) zoveel lek oplevert dat de frequentie-overdracht in het laagfrequente gebied ( $< 200$  Hz) sterk afneemt. Dit heeft grote invloed op de maximaal haalbare lusversterking. Daarom is gebruik gemaakt van een

universele oordop waarmee geen lek optreedt tussen dop en gehoorgang. Het toepassen van een universele oordop heeft het voordeel dat een persoon-onafhankelijk systeem is verkregen. Met de persoonlijk aangemeten otoplastiek is dit niet het geval. Met het otoplastiek wordt wel een betere fixatie in het oor verkregen. Daarom zullen nog experimenten worden uitgevoerd met een otoplastiek van zacht materiaal om na te gaan of hiermee minder lek optreedt en een hoge lusversterking bij lage frequenties kan worden verkregen.

Er werd vastgesteld dat, afhankelijk van de ingestelde lusversterking, het frequentiegebied waar onderdrukking optreedt varieert. Een lagere lusversterking geeft een grotere bandbreedte. Voor het optimaal toepassen van het systeem dient de lusversterking te worden aangepast aan het spectrum van het te onderdrukken geluid. Voor tanklawaai, met sterke componenten onder 500 Hz, zal dus voor een hoge lusversterking worden gekozen. Voor het breedbandig vliegtuiglawaai dient de lusversterking te worden verlaagd.

#### *Telefoon*

De door Philips Asset ontwikkelde miniatuurtelefoon leverde een aanzienlijk vlakkere frequentie-overdracht dan de eerder toegepaste commercieel beschikbare miniatuurtelefoons. Deze laatste worden toegepast bij de 'walkman' en zijn in diverse typen verkrijgbaar. Ter vergelijking is in Fig. 21 de frequentie-overdracht voor beide telefoons gegeven. De beperking van de door ons onderzochte 'walkman' telefoons ligt in het frequentiegebied bij ca. 4 kHz waar een sterke resonantie optreedt die in het uiteindelijke ontwerp de maximale lusversterking beperkt en daarmee de actieve verzwakking. Door Philips Asset is nagegaan of modificatie van de 'walkman' telefoons de resonantie kon verminderen maar dat bleek niet mogelijk.

De nieuwe ontwikkelde telefoon is iets groter dan de walkman telefoons. De produktiekosten liggen in dezelfde orde van grootte.

Door Philips Asset is de invloed van de telefoonbehuizing op de frequentie-overdracht onderzocht en is de optimale relatie tussen volume voor en achter het membraan van de telefoons bepaald. Dit resultaat komt overeen met de relatie die eerder voor oorkappen door TNO-TM was gevonden.

Voor dit project zijn door Philips Asset een gering aantal telefoons handmatig geproduceerd. Het verdient aanbeveling na te gaan of in een seriematige produktie dezelfde eigenschappen kunnen worden gegarandeerd.

De impedantie van de nieuwe Philips Asset telefoon is om technische redenen zeer laag ( $4,7 \Omega$ ). Voor de 'walkman' telefoons ligt deze bij ca.  $15 \Omega$ , dit is gunstiger voor het elektronisch ontwerp van de eindtrap in de regelversterker omdat met grotere spanningen en kleinere stromen kan worden gewerkt.

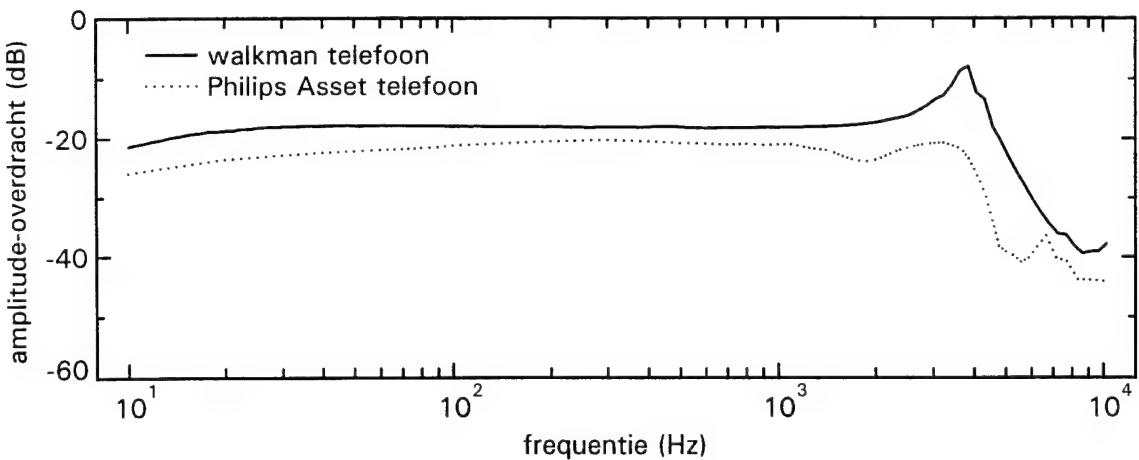


Fig. 21 Amplitude-overdracht voor de door Philips Asset verkregen telefoon in vergelijking met een 'walkman' telefoon.

#### *Aanpassing aan het oor*

Het toepassen van een otoplastiek bleek grote invloed te hebben op de frequentie-overdracht bij frequenties lager dan ca. 200 Hz. Dit maakt het verkrijgen van voldoende lusversterking in dit frequentiegebied onmogelijk. Het toepassen van een Racal of Willson oordop levert echter een veel betere afdichting. Hiermee kon dan ook de beoogde actieve verzwakking bijna worden bereikt.

Het is van belang dat de opening in de oordop die telefoon en microfoon akoestisch met het trommelvlies verbindt niet wordt afgesloten door vuil in de gehoorgang of door het samendrukken van de oordop in een te nauwe gehoorgang. Deze praktische beperkingen dienen nader te worden onderzocht.

Overwogen kan worden of het toepassen van een zacht otoplastiek wel een goede afdichting waarborgt.

#### *Regelcircuit en compensatiennetwerk*

Voor het akoestisch ontwerp van telefoon en microfoon is een specifiek regelcircuit ontworpen gebaseerd op analoge elektronica. Van belang was dat met een grote dynamiek voor hoge geluiddrukken het zwakke microfoonsignaal optimaal wordt aangepast aan de laagohmige telefoon die een maximaal vermogen vraagt van ca. 1 Watt. Het compensatiennetwerk is in dit circuit opgenomen. De frequentie-overdracht van het compensatiennetwerk is geoptimaliseerd met een specifiek softwarepakket. De mogelijkheden van compensatie met een analoog systeem zijn echter beperkt. De stabiliteit in relatie tot de maximale lusversterking wordt voornamelijk bepaald door het akoestisch ontwerp. Met een digitaal regelcircuit wordt verwacht dat meer invloed kan worden uitgevoerd op de bereikbare maximale lusversterking omdat dan een adaptief systeem kan worden gemaakt dat de optimale lusversterking regelt maar tevens instabiliteit kan detecteren en de lusversterking kan aanpassen. De normaal toegepaste veiligheidsmarge van 6 dB kan dus kleiner zijn.

### *Conclusies*

De beoogde verzwakking door actieve geluidreduceertie in een oordop is bijna bereikt (18 dB i.p.v. 20 dB). Het frequentiebereik is echter beperkt tot 500 Hz. Een lagere actieve verzwakking levert een breder frequentiebereik.

Het ontwikkelde systeem maakt gebruik van een specifieke telefoon die een betere frequentie-overdracht bezit dan commercieel verkrijgbare telefoons. De kosten zijn voor beide gelijk. De specifieke telefoon heeft een lage impedantie hetgeen ongunstig is voor de aanpassing met de regelversterker.

Het toepassen van een otoplastiek als aanpassing aan de gehoorgang levert lek. Het toepassen van een oordop geeft goede resultaten en is tevens niet persoonsgebonden. De fixatie aan de gehoorgang is echter geringer.

Alvorens het eventueel produktierijp maken van het systeem verdient het aanbeveling bovenstaande beperkingen nader te onderzoeken en op te lossen.

## REFERENTIES

Bronhorst, A.W. (1995). *Meetmethoden voor niet-lineaire gehoorbeschermers*. Rapport TNO-TM 1995 A-34, Soesterberg: TNO Technische Menskunde.

Carme, Ch. (1987). Réduction active du bruit dans les cavités auditives. Méthode et algorithmes de calcul. *Journal de Mécanique Théorique et Appliquée*, 6, 135-160.

Gauger, D. (1995). Active noise cancellation for military aircraft and vehicles. *Military Technology*, 5/95, 38-45.

Goverts, S.T., Verhave, J.A. & Steeneken, H.J.M. (1995). *Het TNO-TM ANR-systeem bij hoge geluidniveaus*. Rapport TNO-TM 1995 A-65, Soesterberg: TNO Technische Menskunde.

Herzog, P. & Bruneau, A.M. (1993). *Étude electroacoustique d'un bouchon d'oreille*. Rapport final Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine.

Lueg, P. (1936). *Process of silencing sound oscillations*. US Patent No. 2043416.

Olson, H.F. & May, E.G. (1953). Electronic sound absorber. *Journal of the Acoustical Society of America*, 25, 1130-1136.

Steeneken, H.J.M. (1990). Actieve geluidonderdrukking: Een mogelijkheid om de geluidverzwakking van gehoorbeschermers bij lage frequenties te verhogen. *Nederlands Akoestisch Genootschap*, journaal 102, 9-14.

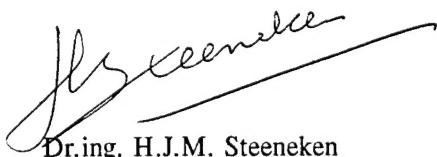
Steeneken, H.J.M. & Langhout, G. (1985). *Application of active noise reduction for hearing protection and intelligibility improvement*. Report IZF 1985-7, Soesterberg, NL: TNO Human Factors Research Institute.

Steeneken, H.J.M., Prevo, R., Agterhuis, E. & Blitterswijk, A. van (1992a). *Toepasbaarheid van actieve geluidreductie in een oordop*. Rapport IZF 1992 A-7, Soesterberg: TNO Technische Menskunde.

Steeneken, H.J.M., Prevo, R., Agterhuis, E. & Blitterswijk, A. van (1992b). *Development of an active noise reduction system for hearing protection and speech intelligibility improvement*. Report IZF 1992 A-8, Soesterberg, NL: TNO Human Factors Research Institute.

Steeneken, H.J.M. & Prevo, R. (1993). Actieve Geluidreductie een middel tegen een overmatige dosis lawaai. *Nederlands Militair Geneeskundig Tijdschrift*, 46 (3), 241-246.

Soesterberg, 18 december 1995



Dr. ing. H.J.M. Steeneken

**REPORT DOCUMENTATION PAGE**

1. DEFENCE REPORT NUMBER (MOD-NL) TD 95-1497	2. RECIPIENT'S ACCESSION NUMBER	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER TNO-TM 1995 A-77
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO. 786.4	5. CONTRACT NUMBER A94/D/326	6. REPORT DATE 18 December 1995
7. NUMBER OF PAGES 28	8. NUMBER OF REFERENCES 12	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE  Ontwikkeling van een oordop met actieve geluidreductie (Development of an earplug equipped with active noise reduction)		
11. AUTHOR(S) H.J.M. Steeneken, J.A. Verhave and S.T. Goverts		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES)  TNO Human Factors Research Institute Kampweg 5 3769 DE SOESTERBERG		
13. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES)  Director of Defence Research and Development Plein 4 2511 CR DEN HAAG		
14. SUPPLEMENTARY NOTES		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS, 1044 BYTE)  In cooperation with Philips Asset and Groeneveld Elcea an earplug was developed equipped with an active noise reduction system. The goal, to achieve a extra active attenuation of 20 dB, is almost reached. An attenuation of 18 dB was obtained for frequencies below 500 Hz. Reduction of the loop-gain results in an extension of the frequency range with a lower attenuation. The system uses a specific telephone with an improved frequency response with respect to the standard walkman telephones. The costs of both telephone types are equivalent. The special designed telephone, however, has a low impedance which requires a complex adaptation to the electronic control unit. The use of a personal moulded earplug as connection between the ear canal and the electro acoustic part of the system gives some leakage. Application of a standard earplug gives better results and is general applicable, however, the fixation with the ear canal is not as robust as with a personal moulded plug.		
16. DESCRIPTORS		IDENTIFIERS
Active Reduction Hearing Protection Intelligibility Noise Reduction		
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT)	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE)	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT)
18. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT  Unlimited availability		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES)

## VERZENDLIJST

1. Directeur M&P DO
2. Directie Wetenschappelijk Onderzoek en Ontwikkeling Defensie
3. {
  - Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KL
  - Plv. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KL
4. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KLu
5. {
  - Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KM
  - Plv. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KM
- 6, 7, 8. Hoofd van het Wetensch. en Techn. Doc.- en Inform.  
Centrum voor de Krijgsmacht
9. Maj.ir. J.H.J. Verhulst, Koninklijke Luchtmacht, Afdeling Wetenschappelijke  
Ondersteuning, Den Haag

Extra exemplaren van dit rapport kunnen worden aangevraagd door tussen-  
komst van de HWOs of de DWOO.

## VERZENDLIJST

1. Directeur M&P DO
2. Directie Wetenschappelijk Onderzoek en Ontwikkeling Defensie
3. {
  - Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KL
  - Plv. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KL
4. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KLu
5. {
  - Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KM
  - Plv. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KM
- 6, 7, 8. Hoofd van het Wetensch. en Techn. Doc.- en Inform. Centrum voor de Krijgsmacht
9. Maj.ir. J.H.J. Verhulst, Koninklijke Luchtmacht, Afdeling Wetenschappelijke Ondersteuning, Den Haag

Extra exemplaren van dit rapport kunnen worden aangevraagd door tussenkomst van de HWOs of de DWOO.